干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

塔里木河生态输水条件下土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响

张　帅[1]，汪　洋[1]，夏婷婷[1]，常雪儿[1]，李　稚[2]

(1. 新疆农业大学草业与环境科学学院，新疆 乌鲁木齐　830052；
2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830011)

摘　要： 基于2000—2020年土地利用数据，采用修正后的单位面积价值当量法、生态系统服务变化指数与探索性空间分析手段，分析了塔里木河下游自生态输水以来生态系统服务功能的时空变化特征。结果表明：(1) 自2000年生态输水以来，塔里木河下游耕地、林地和草地面积分别增长了18.6 km^2、54.7 km^2和76.7 km^2，裸地面积减少了104.0 km^2；其中耕地和林地增长面积主要分布在大西海子水库—英苏段，草地增长面积主要分布在英苏—阿拉干段和阿拉干—台特玛湖段。(2) 塔里木河下游生态系统服务价值由2000年的42.66×10^9元增长到了2020年的45.86×10^9元，增长了3.20×10^9元，且生态系统服务价值低值土地利用类型向高值土地利用类型转化频繁。(3) 塔里木河下游生态系统服务价值Global Moran's *I* 由2000年的0.7552增长到2020年的0.7639，该地区生态系统服务价值存在明显的正向空间自相关关系，且增值区主要集中分布在大西海子水库—英苏段，损失区主要分布在英苏—阿拉干段和阿拉干—台特玛湖段。塔里木河下游生态输水对该地区生态环境修复起到了积极的作用，有效提升了该区域的生态系统服务价值。

关 键 词： 土地利用；生态系统服务价值；生态输水过程；塔里木河

文章编号：

生态系统服务(Ecosystem service)是人类通过生态系统结构、过程和功能直接或间接获取到与福祉关系密切相关的产品和服务[1]，是开展生态环境稳定可持续发展的基础[2]。然而伴随着人类活动强度加大，对生态系统造成了严重的破坏，并对区域生态系统服务价值(Ecosystem service value，ESV)产生了显著影响，导致生态系统服务能力也随之降低和退化[3]。Costanza等[4]在1997年制定了全球ESV评估体系，使得生态系统服务研究逐渐成为了生态学中的热点。目前，ESV评估大致可以分为2类，即基于单位服务功能价格的方法和基于单位面积价值当量因子的方法。功能价值法有较多的输入参数、导致计算过程更加繁琐，最重要的是，它不能很好地统一每种服务价值的评价方法和参数标准[5]。当量因子法与服务价值法相比，当量因子法更为直观，易于使用且所需数据少，它非常适合在区域和全球范围内评估ESV[6]。我国学者谢高地等[7]基于Costanza评估模型，依据中国生态系统的实际情况改进了ESV系数，建立了一套可广泛应用于评估中国各省市、岛屿及流域等生态系统服务的ESV系数。

塔里木河下游地处我国西北干旱区，流域内生态环境脆弱，生物多样性破坏严重，是我国在研究全球变化过程的关键区域之一[8]。自20世纪50年代以来，该地区受气候变化和高强度密集性人类活动的影响，土地利用结构遭到破坏，主要表现为裸地的不断扩张，植被面积的下降[9]，致使流域内水资源配置问题日益严重[10]；加之中、上游地区水资源

收稿日期： 2021-02-02；　**修订日期：** 2021-02-25
基金项目： 国家自然科学基金项目(41661015)；科技部科技基础资源调查专项(2019FY100203)
作者简介： 张帅(1995-)，男，硕士研究生，主要从事干旱区草地生态等方面的研究. E-mail: GMFzhangshuai@163.com
通讯作者： 汪洋(1987-)，男，副教授，主要从事干旱区草地生态等方面的研究. E-mail: ktwangyang@163.com

的无序利用使得该地区自然植被逐渐衰退，荒漠化程度加重，严重阻碍了社会生态文明的发展，威胁流域生态安全[11]。自2000年以来，针对塔里木河下游沿岸地区的生态恢复需求，开展了间歇性生态输水工程[12]，在一定程度上缓解了该地区生态恶化进程[13]。塔里木河下游生态输水工程对该地区生态修复的影响得到了广泛关注，王希义等[14]监测了塔里木河下游地区生态输水后地下水位的变化，分析了地下水位对生态输水的响应。陈亚宁等[15]以地下水埋深为切入点，评估了生态输水后塔里木河下游地区生态修复情况。Hao等[16]通过对塔里木河下游地区植被长势监测，分析了该地区生态输水后植被生长的响应。蔚亮等[17]借助多源遥感数据，从时间尺度分析了塔里木河下游部分地区的湿地变化特征。本研究以生态输水后塔里木河下游土地利用/覆被变化为切入点，通过修正后的单位面积价值当量因子法，探究输水后该地区生态系统服务功能的时空变化特征，并基于植被归一化植被指数(NDVI)数据进行叠加分析，以便真实揭示输水的生态效果，阐明输水对生态系统服务的影响。从生态系统服务功能角度评价生态输水后该地区生态资产的变化特征，进而为干旱区生态修复及水资源调配提供依据。

1 研究区概况

研究区位于塔里木河下游大西海子水库至台特玛湖，总长约为430 km，面积约为4860 km²，根据该地区不同的区域特点，将其划分为上段(大西海子水库—英苏)、中段(英苏—阿拉干)和下段(阿拉干—台特玛湖)3个河段(图1)，行政区划隶属于尉犁县和若羌县，东西两侧分别与库鲁克沙漠和塔克拉玛干沙漠相邻。该地区地处我国西北干旱区腹地，为典型的大陆性干旱气候，日照时间长，降水稀少，气温高[18]。2000年以前该区域因塔里木河上、中游地区水资源不合理利用及人类活动强度剧烈，导致流域内产生荒漠化程度加剧、生态环境日益恶化与水资源匮乏等生态问题，引来了政府、社会与国内外科研人员的广泛关注，因此我国政府注资107×10^8元启动了塔里木河流域的生态综合治理工程，于2000年7月在塔里木河下游地区实施了以遏制生态环境持续恶化、拯救塔里木河下游“绿色走廊”与修复生态环境为目的的生态输水工程。截止2020年，已向塔里木河下游实施生态输水21次，累计输水量达88.45×10^8 m³[19]。

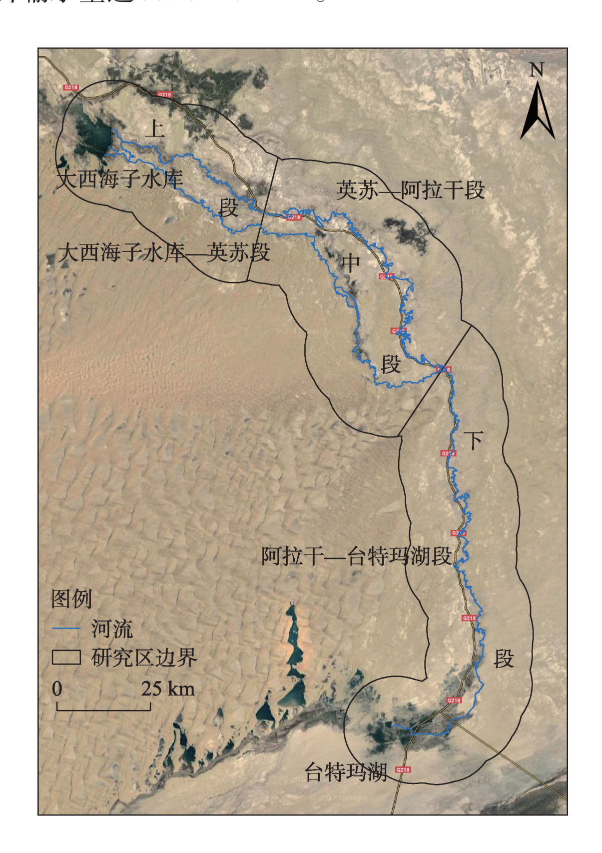


图1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

本研究所使用的塔里木河下游2000—2020年5期土地利用数据来自于中国科学院环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)，其中空间分辨率为30 m，该数据分类精度达到90%以上[20]；依据全国土地利用分类体系，结合研究区实际情况与研究目的，将研究区内的土地利用类型分为耕地、林地、草地、建设用地和裸地；研究所涉及的社会经济数据均来源于2000—2020年《新疆统计年鉴》、《生产建设兵团统计年鉴》及新疆维吾尔自治区统计局网站(http://www.xjtj.gov.cn/)[21-22]。

本研究所使用的塔里木河下游地区2000—2020年NDVI数据来自于NASA EOS/MODIS数据(http://wist.echo.nasa.gov/api)的MOD13Q1数据，空间分辨率为250 m，间隔为16 d，覆盖整个流域的MODIS遥感影像共有两景(h24v05和h24v04)，每年共计23个时相的数据。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务价值估算 本研究参照谢高地等[23]提出的基于中国实际情况进行改进的Costanza评价模型[4]，得出中国ESV当量。根据研究区所在行政单元的单位面积农作物产量与价值对ESV系数进行修正，修正方法为在该地区各粮食作物单产、播种面积、各粮食作物平均价格的基础上进行计算，公式如下[24]：

$$E_a = \frac{1}{7}\sum_{i=1}^{n}\frac{m_i p_i q_i}{M}\ (i = 1,\cdots,n) \tag{1}$$

式中：E_a为1 hm²耕地每年粮食作物的价值(元·hm⁻²)；i为作物种类，该地区的主要作物为小麦和玉米；p_i为i种粮食作物的全国平均价值(元·kg⁻¹)；q_i为i种作物的单产(kg·hm⁻²)；m_i为i种粮食作物面积(hm²)；M为n种粮食作物的总面积(hm²)；1/7是指单位面积ESV为该地区当年主要粮食作物单位面积产值的1/7。

本研究通过统计1990—2019年塔里木河下游所属行政单位粮食作物的平均价格、单产、播种面积等数据，计算得出该地区单个ESV当量因子为1881.82元·hm⁻²，并根据本研究区具体情况将中国ESV当量表中的农田与难利用地划分为耕地和裸地，且相关研究表明建设用地仅具有文化娱乐生态服务功能[25]，以此得到塔里木河下游生态系统单位面积服务价值系数(表1)。

根据塔里木河下游生态系统单位面积服务价值系数，计算研究区的生态系统服务价值(ESV)，计算公式如下[26]：

$$\mathrm{ESV} = \sum A_a \times \mathrm{VC}_a$$
$$\mathrm{ESV}_b = \sum A_a \times \mathrm{VC}_{ba} \tag{2}$$

式中：ESV_b为第b项的生态系统服务价值；A_a为研究区a类土地利用类型的面积；VC_a表示a类土地利用类型的生态系统服务价值系数；VC_{ba}表示a类土地利用类型的第b项生态系统服务价值。

2.2.2 生态系统服务变化指数 本研究借助生态系统服务变化指数(Ecological services change index，ESCI)来确定生态系统服务的变化[27]，以此表示各项生态系统服务的相对增益或减损。其计算公式为：

$$\mathrm{ESCI} = \frac{\mathrm{ES_{CUR}} - \mathrm{ES_{HIS}}}{\mathrm{ES_{HIS}}} \tag{3}$$

式中：ESCI表示生态系统服务变化指数；$\mathrm{ES_{CUR}}$、$\mathrm{ES_{HIS}}$分别对应的是始末状态下的生态系统服务。当ESCI>0，表示有增益；当ESCI<0，表示有减损；当ESCI=0，表示无变化。

2.2.3 探索性空间分析 基于GeoDa模型中的Global Moran's I和Local Moran's I探究ESV空间分布格局的集聚和异常[28]。公式分别为：

$$I_i = \frac{x_i - \bar{X}}{S_i^2}\sum_{j=1,j\neq 1}^{n} w_{i,j}(x_j - \bar{X}) \tag{4}$$

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1,j\neq 1}^{n}(x_j - \bar{X})^2}{n-1} \tag{5}$$

式中：x_i是因子i的值；$\bar{X}$是因子值的平均值；$w_{i,j}$是因子i和j之间的空间权重矩阵；n是因子的总数；S是标准差。

3 结果与分析

3.1 输水后塔里木河下游土地利用变化

塔里木河下游地区自2000年开始进行生态输水后土地利用结构(表2)及土地利用现状(图2)表

表1 塔里木河下游生态系统服务价值(ESV)系数

Tab. 1 Coefficient of ecosystem service value (ESV) in the lower reaches of Tarim River /元·hm⁻²

生态系统服务功能	土地利用类型				
	耕地	林地	草地	建设用地	裸地
气体调节	940.91	6586.37	1505.46	0.00	0.00
气候调节	1674.82	5080.92	1693.64	0.00	0.00
水源涵养	1129.09	6021.83	1505.46	0.00	56.45
土壤形成与保护	2747.46	7339.10	3669.55	0.00	37.64
废物处理	3086.19	2465.18	2465.18	0.00	18.82
生物多样性保护	1336.09	6134.74	2051.18	0.00	639.82
食物生产	1881.82	188.18	564.55	0.00	18.82
原材料生产	188.18	4892.73	94.09	0.00	0.00
娱乐文化	18.82	2408.73	75.27	82.60	18.82
合计	13003.38	41117.78	13624.38	82.60	790.36

表2　2000—2020年塔里木河下游各土地利用类型面积

Tab. 2　Area of each land use type in the lower reaches of Tarim River during 2000—2020　/10^3 hm^2

土地利用类型	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2000—2020年
耕地	3.68	3.82	3.82	3.93	5.54	1.86
林地	37.25	39.59	39.57	42.6	42.72	5.47
草地	182.35	178.57	185.26	184.27	190.02	7.67
建设用地	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.00
裸地	255.24	246.76	245.77	244.84	244.84	-10.40

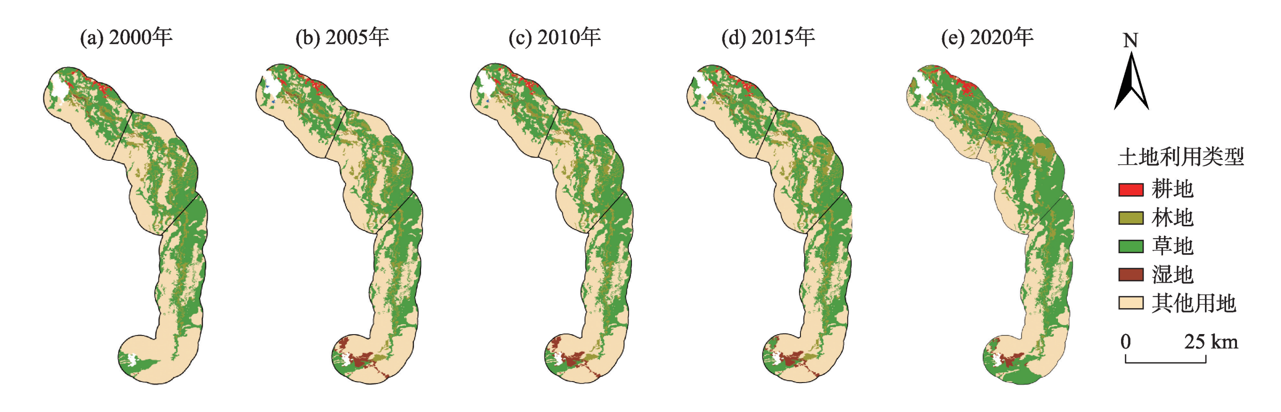


图2　2000—2020年塔里木河下游各土地利用类型的空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of each land use type in the lower reaches of Tarim River during 2000—2020

明，裸地始终为该地区面积最大、分布最广的土地利用类型，占据研究区生态系统的主导地位，截止至2020年，裸地占该地区总面积的50.36%，主要分布在英苏—阿拉干段和阿拉干—台特玛湖段；草地次之，占总面积的38.62%，主要以围绕着河道两边生长的形式分布；林地和耕地分别占总面积的8.76%和0.81%，其中林地与草地分布规律相近，耕地则分布在大西海子水库—英苏段；建设用地面积最小，仅占总面积的0.10%。

塔里木河下游大西海子水库—英苏段、英苏—阿拉干段和阿拉干—台特玛湖段的耕地、林地和草地分布情况表明（表3），草地是该地区的主要植被覆盖类型，2000—2020年3个河段的草地面积均表现为增长趋势，其中面积增长最大的河段是阿拉干—台特玛湖段，面积增长了约3.62×10^3 hm^2，大西海子水库—英苏段次之，增长了约为2.55×10^3 hm^2，英苏—阿拉干段增长面积最少，约为1.5×10^3 hm^2；整个塔里木河下游的草地面积从2000年的182.35×10^3 hm^{2}增长至2020年的190.02×10^3 hm^2；林地面积在大西海子水库—英苏段和英苏—阿拉干段表现为增长趋势，在阿拉干—台特玛湖段呈现出略微的下降趋势，整个塔里木河下游的林地面积由2000年的37.25×10^3 hm^{2}增长至2020年的42.72×10^3 hm^2；耕地仅出现在了大西海子水库—英苏段，其它2个河段不具备农作物生长的条件，其面积表现为增长趋势，但其面积占总面积比重较少，整体表现不显著。

3.2　输水后塔里木河下游生态系统服务价值变化

3.2.1　时间尺度下生态系统服务价值变化趋势　本文基于塔里木河下游地区各土地利用类型面积，分别估算了该地区2000、2005、2010、2015和2020年的ESV（表4）。2000—2020年塔里木河下游地区ESV整体表现为波动式增长，由2000年的42.66×10^8元增长到2020年的45.86×10^8元，共增长了3.20×10^8元，约为7.50%，其中各用地类型中仅裸地的ESV表现为下降趋势，这一现象表明，水资源的补给使得研究区各生态系统功能相互转化关系表现为正向发展趋势，低ESV的土地利用类型向高ESV的土地利用类型转化，该地区的生态资产增长，表明该地区各生态系统也均处于正向发展趋势。

塔里木河下游地区的调节服务、支持服务、供给服务和文化服务在2000—2020年均表现为增长趋势（表5）。

调节服务包含气体调节、气候调节、水源涵养和废物处理4项服务功能，该4项功能在2000—

表3　2000—2020年塔里木河下游植被覆盖类型面积

Tab. 3　Proportion of vegetation cover area in lower reaches of Tarim River during 2000—2020　/10³ hm²

植被覆盖类型	塔里木下游区段	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2010—2020年
耕地	大西海子水库—英苏段	3.68	3.82	3.82	3.93	5.54	1.86
	英苏—阿拉干段	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	阿拉干—台特玛湖段	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
林地	大西海子水库—英苏段	7.88	7.88	7.88	7.86	13.35	5.47
	英苏—阿拉干段	21.71	21.64	21.63	24.68	22.68	0.97
	阿拉干—台特玛湖段	7.66	10.07	10.06	10.06	6.69	-0.97
草地	大西海子水库—英苏段	43.54	43.42	50.13	50.05	46.09	2.55
	英苏—阿拉干段	60.49	61.34	61.33	58.81	61.99	1.50
	阿拉干—台特玛湖段	78.32	73.81	73.80	75.41	81.94	3.62

表4　2000—2020年塔里木河下游生态系统服务价值(ESV)

Tab. 4　Ecosystem service value (ESV) in the lower reaches of Tarim River during 2000—2020

土地利用类型	2000年		2005年		2010年		2015年		2020年	
	ESV/10⁸元	占比/%	ESV/10⁸元	占比/%	ESV/10⁸元	占比/%	ESV/10⁸元	占比/%	ESV/10⁸元	占比/%
耕地	0.48	1.13	0.50	1.16	0.50	1.14	0.51	1.17	0.51	1.11
林地	15.32	35.91	16.28	37.81	16.27	37.02	15.90	36.59	17.52	38.21
草地	24.84	58.22	24.33	56.50	25.24	57.43	25.11	57.80	25.89	56.45
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
裸地	2.02	4.74	1.95	4.53	1.94	4.41	1.93	4.44	1.94	4.23
合计	42.66	100.00	43.06	100.00	43.95	100.00	43.45	100.00	45.86	100.00

表5　2000—2020年塔里木河下游各项生态系统服务类型价值

Tab. 5　ESV of each ecosystem service type in the lower reaches of Tarim River during 2000—2020　/10⁸元

一级类型	二级类型	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
调节服务	气体调节	5.23	5.33	5.43	5.36	5.70
	气候调节	5.04	5.10	5.21	5.15	5.45
	水源涵养	5.18	5.25	5.35	5.28	5.61
	废物处理	5.58	5.54	5.71	5.66	5.90
	小结	21.03	21.22	21.7	21.45	22.66
支持服务	土壤形成与保护	9.62	9.66	9.90	9.80	10.30
	生物多样性保护	7.71	7.73	7.85	7.77	8.14
	小结	17.33	17.39	17.75	17.57	18.44
供给服务	食物生产	1.22	1.20	1.24	1.23	1.27
	原材料生产	2.00	2.11	2.12	2.07	2.27
	小结	3.22	3.31	3.36	3.3	3.54
文化服务	娱乐文化	1.08	1.14	1.14	1.13	1.22
	合计	42.66	43.06	43.95	43.45	45.86

2020年均表现为增长趋势。调节服务主要受到耕地、林地和草地的影响,由于研究区草地面积占总面积的比重较之其它2种地类为最大,所以研究区调节服务的变化与草地面积的变化保持较高的相关关系。水源涵养和废物处理服务功能呈现出上升趋势,与草地面积的变化一致。

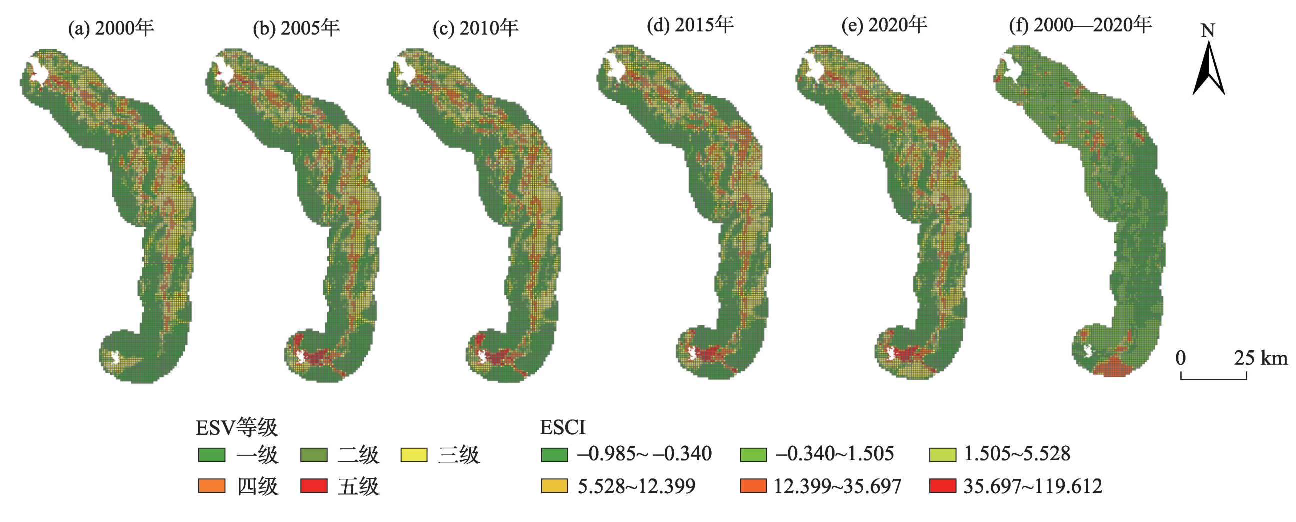
塔里木下游地区支持服务在2000—2020年保持上升趋势。支持服务主要受到耕地、林地和草地

的影响，林地和耕地面积持续性增长、草地波动式增长但其面积占比高，在此三者综合作用推动下该项服务表现为波动式增长趋势。

食物生产与原材料生产2项服务功能为供给服务，娱乐文化服务功能为文化服务，该2项服务功能在研究区中ESV所占比重较小。其中，供给功能主要受到耕地、林地和草地的影响，耕地面积增长与草地面积波动式增长，使得农作物和畜产品的产量增加，但由于该地区生态环境不适农畜产品的发展，该项服务增长趋势并不显著，这一变化与耕地和草地的面积变化趋势相似，供给服务的变化主要受耕地、林地和草地3个地类的综合影响，整体上保持上升趋势但并不显著。

文化服务功能在2000—2020年也表现为增长趋势，该项服务功能主要受到林地和草地的影响，其变化趋势与林地面积的变化趋势一致。

3.2.2 空间尺度下生态系统服务价值变化趋势 本文通过ArcGIS 10.2软件中的渔网工具经过多次筛选，将研究区划分为大小1 km×1 km[29]的5104个网格，分别计算网格内各地类面积，采用自然断点法对塔里木河下游地区生态系统服务价值与生态系统服务价值的损益进行空间显示化表达(图3)。



注：ESV为生态系统服务价值；ESCI为生态系统服务价值损益变化。下同。

图3 2000—2020年塔里木河下游ESV及其损益变化的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of ESV and ecological services change index (ESCI) in the lower reaches of Tarim River during 2000—2020

参照研究区2000年和2020年ESV空间分布情况可知，塔里木河下游ESV的高值区主要分布在大西海子水库—英苏段，其主要分布在河道两岸，ESV的低值区则分布在距离河道两岸较远的区域，这与研究区的地貌类型分布特征契合，即距离河道两岸较远的区域分布着大面积的裸地，ESV较低；河道两岸周围的区域分布着林地以及草地，ESV较高；ESV的高值区主要分布在该地区的大西海子水库—英苏段、英苏—阿拉干段的草地区域。对比2000年和2020年ESV空间分布变化，高值区呈现出上升态势，低值区逐渐向高值区转化，整体上来看，研究区ESV呈现出上升趋势。

根据2000—2020年塔里木河下游ESV的损益变化(ESCI)可得，在过去20 a间，塔里木河下游ESV整体上表现为增长趋势，主要是由于该地区ESV较低的用地类型(如裸地)转化为ESV较高的用地类型(如草地、林地)。阿拉干—台特玛湖段出现大面积的增益区域，主要是由于草地面积的增长；英苏—阿拉干段还存在一些减损区，主要是由于该河段高值用地向低值用地类型转化(既林地向草地转化)使得该地区ESV出现轻微幅度的减损，但该地区大部分地区ESV均表现为增益，主要得益于生态输水后该地区草地、林地面积的增长。

3.2.3 探索性空间分析 本文通过GeoDa模型下的探索性空间分析手段(既全局、局部莫兰指数)，计算得出塔里木河下游2000—2020年ESV的空间格

局特征(图4)。据计算结果得出,研究区的ESV分布存在非常显著的空间相关性,即ESV值高的区域空间分布集聚,反之亦然。2000—2020年该地区的全局Moran's *I*指数呈现上升趋势,2000年为0.7552,2020年为0.7639,表明2020年研究区ESV的空间相关性较之2000年表现为上升趋势,这一变化受该地区ESV值较高的区域(草地和林地)面积增长影响。此结果仅判断出研究区存在的同类集聚现象,其空间集聚结构尚不明确,本文通过计算研究区ESV的Local Moran's *I*进行分析,得到LISA聚类图(图5)。

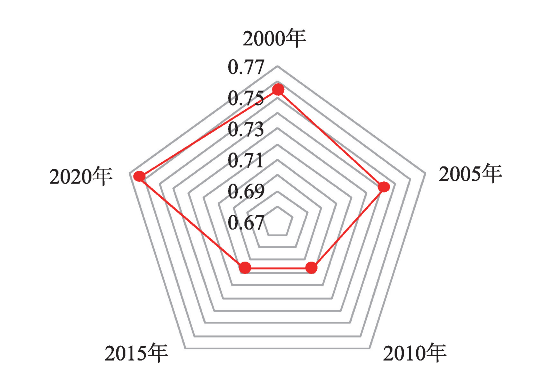


图4　2000—2020年塔里木河下游ESV全局莫兰指数
Fig. 4　Global Moran's *I* of ESV in the lower reaches of Tarim River during 2000—2020

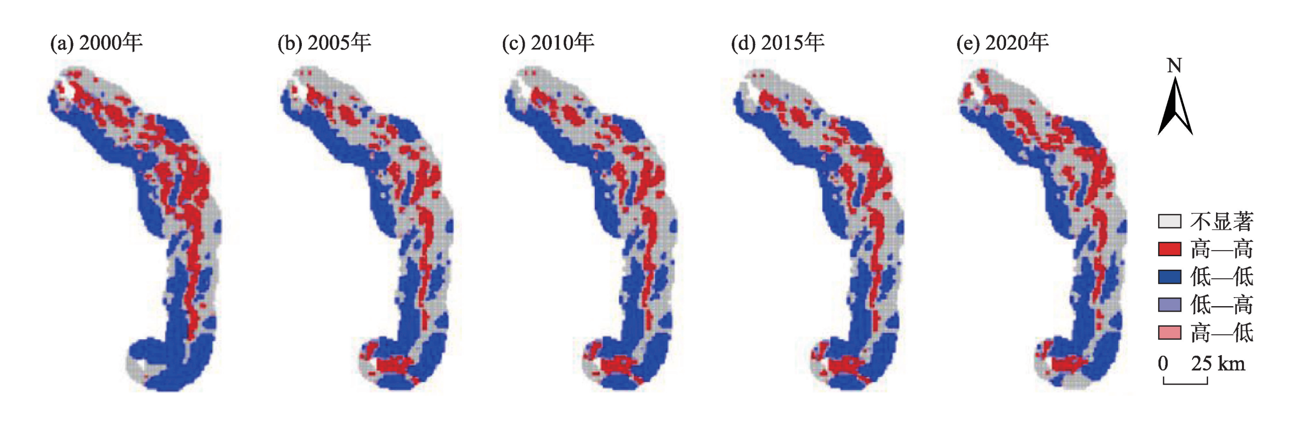


图5　2000—2020年塔里木河下游ESV的LISA聚类图
Fig. 5　Lisa cluster diagram of ESV in the lower reaches of Tarim River during 2000—2020

研究区ESV主要空间集聚类型为高—高、低—高、低—低类型区(图5)。2000—2020年ESV高—高值区主要分布在大西海子水库—英苏段,该区域主要是ESV高值区分布区域,ESV值较高的地类(草地和林地)资源丰富,且2020年高—高类型区较2000年呈现出明显增长趋势,这主要得益于生态输水后塔里木河下游地区地表与地下水资源得以补给,沿河道两岸地区植被生长条件改善,植被类型表现为正向发展趋势(即草地向林地转化、未利用地向草地转化),因此植被面积增长,是高—高集聚类型区面积增长的主要原因,同时该类型区的生态环境也得以改善;低—高类型区主要分布在大西海子水库—英苏段,该类型区域分布主要地类为裸地和草地,但其分布并不明显;低—低类型区主要分布在该地区距离河道较远的区域,主要地类为ESV值低的裸地,由于该类型区距河道较远,水资源供给无保障,植被生长条件较为匮乏,且生态环境脆弱,多为难开发利用区域,因此该类型区域受到气候与水资源等自然要素的制约,植被生长环境易受到破坏,故在空间上表现为低集聚类型。

4　讨 论

塔里木河下游自2000年以来生态输水后各土地利用类型之间转化剧烈,从塔里木河下游地区植被NDVI时空分布特征变化可以看出(图6),该地区整体NDVI在2000—2020年增长了约0.07,增幅约33%,其中主要的增长集中分布在英苏—阿拉干段和阿拉干—台特玛湖段,NDVI分别增长了0.07和0.09。该地区植被类型主要有林地和草地,通过NDVI变化特征与土地利用资料表明,该地区整体上植被覆盖面积自2000年以来表现为增长趋势,且对比ESV空间分布特征发现,该地区ESV表现为增长趋势主要是由于裸地向草地与林地转化。该地区属于极端干旱区,降水在该地区几乎没有生态意义,地下水与土壤水分是该地区植被生长所需水源

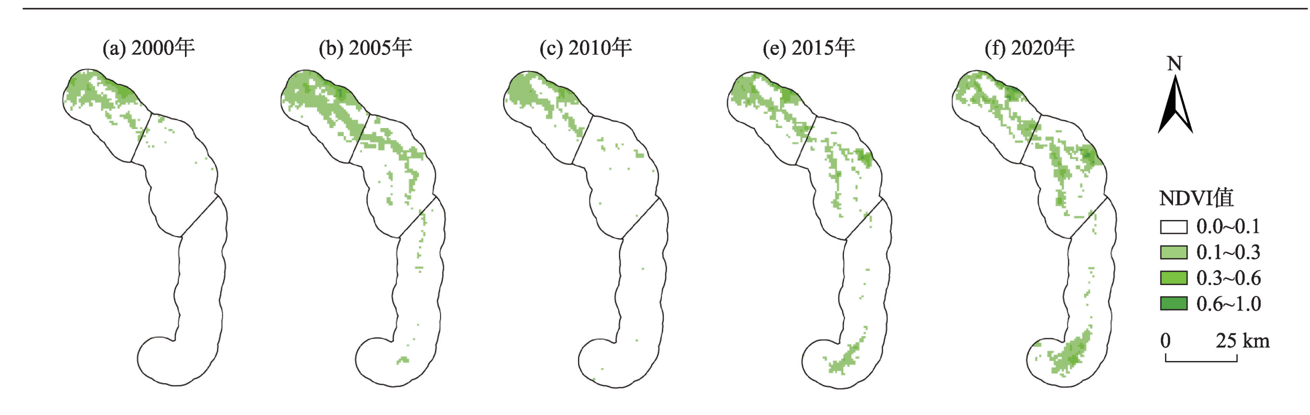


图6　2000—2020年塔里木河下游归一化植被指数(NDVI)空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of NDVI in the lower reaches of Tarim River from 2000 to 2020

的主要供给[18],该地区地下水位自生态输水后呈现出了明显的抬升[30],因此由于受到生态输水及政策倾向的综合作用,草地与林地的面积增长,使得该地区原本极端且脆弱的生态环境得以改善,且ESV低值用地类型向高值用地类型转化,是研究区自2000年以来ESV增长的主要原因之一。

目前有关于ESV的方法与研究很多,但并没有形成一套完善的评估体系,因此在ESV研究中如何选取区域适用性高的评估体系尚处于摸索阶段。本研究与白元等[31]基于货币量的价值评价法估算出2005—2010年塔里木河干流ESV表现为上升趋势的结果相似。且相关研究表明该地区在生态输水后,地下水位抬升[32]、植被覆盖度增加[19]、植被总初级生产力与植被碳汇区域扩大[33],植被生长所需的水热条件较之生态输水前得以改善,植被覆盖面积也表现出了明显的增长趋势,植被作为ESV较高类型,使得该地区ESV表现为增长趋势,表明生态环境也处于正向发展。

5　结 论

本文基于塔里木河下游的土地利用数据,通过划分网格单元且采用修正后的单位面积价值当量法,研究了2000—2020年塔里木河下游地区ESV的时空变化特征,得出以下主要结论:

(1) 塔里木河下游地区主要以裸地、草地为主,二者共占地面积约为总面积的85%以上。研究时段内,该地区耕地、林地和草地面积呈现持续增长趋势,裸地表现为减少趋势。

(2) 2000—2020年塔里木河下游ESV表现为上升趋势,共增长了3.20×10^8元,其中调节服务与支持服务增长最显著,主要原因为这期间生态输水后该地区植被生长条件得到改善,水资源的补给使得林地和草地面积增长,ESV低值土地利用类型向高值土地利用类型转化频繁。

(3) 空间上,2000—2020年塔里木河下游ESV的增值区主要集中分布在大西海子水库—英苏段及阿拉干—台特玛湖段南部;ESV的损失区主要分布在英苏—阿拉干段和阿拉干—台特玛湖段的裸地。

参考文献(References)

[1] Darvill R, Lindo Z. The inclusion of stakeholders and cultural ecosystem services in land management trade-off decisions using an ecosystem services approach[J]. Landscape Ecology, 2016, 31(3): 533-545.

[2] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4-11.

[3] 孙庆祥, 周华荣. 阿尔泰山森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1327-1336. [Sun Qingxiang, Zhou Huarong. Service function and value evaluation of the Altai Mountains forest ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 43(5): 1327-1336.]

[4] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[5] Sun J. Research advances and trends in ecosystem services and evaluation in China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 1791-1796.

[6] Wang Z Y, Cao J S. Assessing and predicting the impact of multi-scenario land use changes on the ecosystem service value: A case study in the upstream of Xiong'an new area, China[J]. Sustainability, 2021, 13(2): 704-704.

[7] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2005, 37(9): 1740-1746. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Changshun, et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resources Science, 2005, 37(9): 1740-1746.]

[8] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 科技支撑新疆塔里木河流域生态修复及可持续管理[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 901-907. [Chen Yaning, Li Weihong, Chen Yapeng, et al. Science in supporting the ecological restoration and sustainable development of the Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 901-907.]

[9] 陈亚宁, 叶朝霞, 毛晓辉, 等. 新疆塔里木河断流趋势分析与减缓对策[J]. 干旱区地理, 2009, 32(6): 813-820. [Chen Yaning, Ye Zhaoxia, Mao Xiaohui, et al. Dried-up trend of Tarim River and the countermeasures for mitigation[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(6): 813-820.]

[10] 黄粤, 包安明, 王士飞, 等. 间歇性输水影响下的2001—2011年塔里木河下游生态环境变化[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1251-1262. [Huang Yue, Bao Anming, Wang Shifei, et al. Eco-environmental change in the lower Tarim River under the influence of intermittent water transpor[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 68(9): 1251-1262.]

[11] 李丽君, 张小清, 陈长清, 等. 近20 a塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 238-247. [Li Lijun, Zhang Xiaoqing, Chen Changqing, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twenty years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 238-247.]

[12] 古力米热·哈那提, 王光焰, 张音, 等. 干旱区间歇性生态输水对地下水位与植被的影响机理研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 726-733. [Hanati Gulimire, Wang Guangyan, Zhang Yin, et al. Influence mechanism of intermittent ecological water conveyance on groundwater level and vegetation in arid land[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 726-733.]

[13] 王珊珊, 王金林, 周可法. 塔里木河下游土地利用/覆被变化对生态输水的响应[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 69-74, 80. [Wang Shanshan, Wang Jinglin, Zhou Kefa. Response of land use/land cover change to ecological water transmission in the lower reach of Tarim River[J]. Water Resources Protection , 2021, 37(2): 69-74, 80.]

[14] 王希义, 徐海量, 凌红波, 等. 生态输水对塔里木河下游植被恢复价值的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 160-166. [Wang Xiyi, Xu Hailiang, Ling Hongbo, et al. Effects of ecological water conveyance on recovery value of vegetation in the lower reaches of Tarim River[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(4): 160-166.]

[15] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 538-545. [Chen Yaning, Li Weihong, Chen Yapeng, et al. Water conveyance in dried-up riverway and ecological restoration in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 538-545.]

[16] Hao X M, Li W H. Impacts of ecological water conveyance on groundwater dynamics and vegetation recovery in the lower reaches of the Tarim River in northwest China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186: 7605-7616.

[17] 蔚亮, 李均力, 包安明, 等. 塔里木河下游湿地面积时序变化及对生态输水的响应[J]. 植物生态学报, 2020, 44 (6): 616-627. [Wei Liang, Li Junli, Bao Anming, et al. Temporal areal changes of wetlands in the lower reaches of the Tarim River and their responses to ecological water conveyance[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(6): 616-627.]

[18] 朱长明, 李均力, 沈占锋, 等. 塔里木河下游生态环境变化时序监测与对比分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(3): 437-444. [Zhu Changming, Li Junli, Shen Zhanfeng, et al. Time series monitoring and comparative analysis on eco-environment change in the lower reaches of the Tarim River[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(3): 437-444.]

[19] 王希义, 彭淑贞, 徐海量, 等. 大型输水工程的生态效益与社会经济效益评价——以塔里木河下游为例[J]. 地理科学, 2020, 40(2): 308-314. [Wang Xiyi, Peng Shuzhen, Xu Hailiang, et al. Evaluation of ecological and social-economic benefits of large water conveyance projects: A case study on the lower reaches of the Tarim River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(2): 308-314.]

[20] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14. [Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 69(1): 3-14.]

[21] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1990—2018. [Statistics Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Xinjiang Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1990—2018.]

[22] 新疆生产建设兵团统计局. 新疆生产建设兵团统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1990—2018. [Statistics Bureau of Xinjiang Production and Construction Corps. Statistical yearbook of Xinjiang Production and Construction Corps[M]. Beijing: China Statistics Press, 1990—2018.]

[23] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value

based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30 (8): 1243−1254.]

[24] 丁丽莲, 王奇, 陈欣, 等. 近30年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2973−2985. [Ding Lilian, Wang Qi, Chen Xin, et al. The responses of ecosystem services to land-use change in Dianshan Lake area from 1984 to 2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): 2973−2985.]

[25] 祖皮艳木·买买提, 海米提·依米提, 安尼瓦尔·艾则孜, 等. 焉耆盆地生态系统服务价值对土地利用/覆被变化的响应[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 275−283. [Maimaiti Zupiyanmu, Yimiti Haimiti, Aizez Anniwaer, et al. Response of ecosystem services value to land use/cover change in the Yanqi Basin of Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 275−283.]

[26] Ling H B, Yan J J, Xu H L, et al. Estimates of shifts in ecosystem service values due to changes in key factors in the Manas River Basin, northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 659: 177−187.

[27] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 868−879. [Qian Caiyun, Gong Jie, Zhang Jinxi, et al. Change and tradeoffs-synergies analysis on watershed ecosystem services: A case study of Bailongjiang Watershed, Gansu[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 73(5): 868−879.]

[28] Li G D, Fang C L, Wang S J. Exploring spatiotemporal changes in ecosystem-service values and hotspots in China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 545−546: 609−620.

[29] 郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 等. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3482−3493. [Guo Chunyang, Gao Shang, Zhou Boyan, et al. Effects of land use change on ecosystem service value in Funiu Mountain based upon a grid square[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3482−3493.]

[30] 刘迁迁, 古力米热·哈那提, 苏里坦, 等. 塔里木河下游河岸带地下水埋深对生态输水的响应过程[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 979−986. [Liu Qianqian, Hanati Gulimire, Sulitan, et al. Response process of groundwater table to ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River riparian zone[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 979−986.]

[31] 白元, 徐海量, 凌红波, 等. 塔里木河干流区土地利用与生态系统服务价值的变化[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1912−1920. [Bai Yuan, Xu Hailiang, Ling Hongbo, et al. Analysis on land use changes and ecosystem services value in the area along the Tarim River[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(6): 1912−1920.]

[32] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 542−549. [Chen Yaning, Li Weihong, Xu Hailiang, et al. The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 542−549.]

[33] 李均力, 肖昊, 沈占锋, 等. 2013—2018年塔里木河下游植被动态变化及其对生态输水的响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 985−992. [Li Junli, Xiao Hao, Shen Zhanfeng, et al. Vegetation changes during the 2013—2018 period and its response to ecological water transport in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 985−992.]

Effects of land use/cover change on ecosystem service value under the ecological water conveyance of Tarim River

ZHANG Shuai[1], WANG Yang[1], XIA Tingting[1], CHANG Xue'er[1], LI Zhi[2]

(1. College of Grassland and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: This study adopts the revised value equivalent method per unit area, ecosystem service change index, and exploratory spatial analysis methods based on the 2000—2020 land use data and socio-economic data in the lower reaches of the Tarim River, Xinjinag, China. The characteristics of the temporal and spatial changes of the ecosystem service functions since the ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River were analyzed and the results obtained were verified using the NDVI data. The results showed that: (1) since the ecological water conveyance in 2000, the area of arable land, woodland, and grassland in the lower reaches of the Tarim River increased by 18.6 km^2, 54.7 km^2, and 76.7 km^2, respectively while the area of the bare land decreased by 104.0 km^2; among them, the increased area of arable land and woodland was mainly distributed in the section from Daxihaizi Reservoir to Yingsu, and the increased area of grassland was mainly distributed in the section from Yingsu to Arakan and from Arakan to Taitma Lake. (2) The value of ecosystem services in the lower reaches of the Tarim River increased from 42.66×10^9 yuan in 2020 to 45.86×10^9 yuan, an increase of 3.2×10^9 yuan. The ecosystem service value of low-value land use types is frequently converted into high-value land-use types, such as the conversion of grassland to forest land and the conversion of unused land to grassland. (3) The global Moran's *I* value of ecological services in the lower reaches of the Tarim River increased from 0.7552 in 2000 to 0.7639 in 2020. The value of the ecosystem services in this area exhibited an evident positive spatial autocorrelation, and the value-added areas were mainly distributed in the Daxi Haizi Reservoir to Yingsu section. Furthermore, the loss area was mainly distributed in the Yingsu to Arakan and Arakan to Taitma Lake sections. The lower reaches of the Tarim River delivered a total of 21 water conveyances from 2000 to 2020. The timely tracking and understanding of the current status of the ecological environment in the area after the ecological water conveyance has important practical significance for the restoration of the ecological environment and improvement of water conveyance strategies. This study estimated the value of the ecosystem services in the lower reaches of the Tarim River from the beginning of the ecological water conveyance project in 2000 until 2020 and intuitively evaluated the development status of the ecological environment in the area after water conveyance from an economic point of view. The results were verified and analyzed using the superimposing land use data and vegetation NDVI data, which further proves that the vegetation growth in this area is in a healthy state of development after the ecological water conveyance. Additionally, owing to the positive development, the ecological environment of the region is also in a state of restoration. The ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River played a positive role in the ecological environment restoration, effectively enhancing the value of ecosystem services in the region. This project maintains the safety and stability of the oasis ecosystem, allowing the ecological security and sustainable development of the lower reaches of Tarim.

Key words: land use; ecosystem service value; ecological water conveyance process; Tarim River